

Evaluación de la incidencia de la producción de compost, usando biomasa de la planta de beneficio, en la huella de carbono del aceite de palma. Estudio de caso*

Evaluation of the Incidence of Composting, Using Palm Oil Mill Biomass in the Carbon Footprint of Crude Palm Oil. Case study

CITACIÓN: Rodríguez, D.T., Ramírez, N.E. y García, J.A. (2015). Evaluación de la incidencia de la producción de compost, usando biomasa de la planta de beneficio, en la huella de carbono del aceite de palma. Estudio de caso. *Palmas*, 36(1), 27-39.

PALABRAS CLAVE: biomasa de la planta de beneficio, compostaje, huella de carbono, gases de efecto invernadero.

KEY WORDS: POM biomass, composting, carbon footprint, greenhouse gas emissions.

RECIBIDO: septiembre de 2014.

APROBADO: diciembre de 2014.

* Artículo de investigación e innovación científica y tecnológica

DEISY TATIANA RODRÍGUEZ PEÑUELA
Auxiliar de Investigación. Programa de
Procesamiento, Cenipalma
dtrodriguez@cenipalma.org

NIDIA ELIZABETH RAMÍREZ CONTRERAS
Asistente de Investigación. Programa
de Procesamiento, Cenipalma

JESÚS ALBERTO GARCÍA NÚÑEZ
Coordinador Programa de
Procesamiento, Cenipalma.
Biological and Agricultural Engineering
Department, Washington State
University

Resumen

La biomasa sólida separada en el proceso de extracción de Aceite de Palma Crudo (APC) y clasificada como tusa o racimos vacíos, fibra y cuesco, representa en promedio el 40 % del peso de los Racimos de Fruta Fresca (RFF) que ingresan a la planta de beneficio, mientras que la biomasa líquida o efluentes, con una Demanda Química de Oxígeno (DQO) entre 40.000 y 60.000 mg l⁻¹, se calculan aproximadamente en 0,8 m³ por tonelada de RFF procesado (García *et al.*, 2010; Miranda *et al.*, 2007). El inadecuado tratamiento y/o disposición de la biomasa puede generar impactos ambientales por la emisión y liberación de Gases de Efecto Invernadero (GEI). El aprovechamiento de la biomasa en la obtención de productos de mayor valor agregado se ha convertido en una oportunidad para el sector, que busca posicionarse en el mercado nacional y mundial con sellos de sostenibilidad como el de la Mesa Redonda de Aceite de Palma Sostenible (RSPO, por sus siglas en inglés) (Yáñez *et al.*, 2011; Stichnothe & Schuchardt, 2011; Yusoff & Hansen, 2007). Este documento presenta la comparación de la huella de carbono realizada para la cadena productiva del APC, con producción y aplicación de compost, como una alternativa para el tratamiento de la biomasa, en comparación con los tratamientos convencionales de tusa y efluentes en Colombia (aplicación de tusa en campo y tratamiento de efluentes en lagunas

de oxidación abiertas). Para el estudio de caso evaluado, el desempeño ambiental del compost en la huella de carbono del APC resulta ser positivo, con una reducción de emisiones de GEI entre 20 y 30 %, causado, entre otros, por el uso de los efluentes en la producción de compost con la consecuente mitigación de la emisión de metano (CH_4) en la laguna anaeróbica.

Abstract

Solid biomass recovered in the extraction process of Crude Palm Oil (CPO), and classified as Empty Fruit Bunch (EFB), mesocarp fiber, and shell, represent on average 40 % of the weight of Fresh Fruit Bunches (FFB) processed in a Palm Oil Mill (POM), while the liquid biomass, Palm Oil Mill Effluent (POME) with a Chemical Oxygen Demand (COD) between 40.000 and 60.000 mg l^{-1} is approximately 0,8 m^3 per ton of FFB processed (García et al, 2010; Miranda et al., 2007). The inappropriate treatment or disposal of biomass can generate environmental impacts due to the release of Greenhouse Gas emissions (GHG). The use of biomass in the manufacturing of high value added products has become an opportunity for the oil palm sector, which is looking for positioning in the national and global market through sustainability certifications such as the RSPO (Roundtable Sustainable Palm Oil). (Yáñez et al., 2011; Stichnothe & Schuchardt, 2011; Yusoff & Hansen, 2007). This paper presents a comparison between the carbon footprint (CFP) of APC with the production and application of compost as an alternative for biomass treatment, and the CFP for the current APC chain, with conventional biomass and effluent treatments in Colombia (EFB application into the field and effluent treatment in uncovered anaerobic lagoons). The environmental performance of the compost in the CFP of APC appears to be positive, with a decreasing in GHG emissions of 20 to 30 %, caused, among others, by the use of effluent in the production of compost and the mitigation of methane emissions (CH_4) in the anaerobic lagoon.

Introducción

La agroindustria de la palma de aceite en Colombia afronta actualmente grandes retos en cuanto a la productividad del cultivo, el potencial de extracción de APC en la planta de beneficio, el incremento de los parámetros máximos permisibles respecto a emisiones de material particulado en las chimeneas de las calderas de generación de vapor, y más recientemente, en las regulaciones que está estudiando el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, para ajustar los parámetros de calidad de los vertimientos puntuales generados en plantas de beneficio. Para afrontar estos retos, se ha propuesto el uso de la biomasa en la generación de productos de mayor valor agregado, basado en el aprovechamiento máximo de la materia prima que ingresa a la planta de beneficio y en la disponibilidad de biomasa para la implementación de nuevas unidades de procesamiento adyacentes a la planta ya establecida, con el objetivo no solo de generar nuevos productos, sino

de disminuir el impacto ambiental negativo en las plantas de beneficio.

Los principales productos de la agroindustria de la palma de aceite son el APC y la almendra, que representan en promedio 21 y 5 % del peso de los RFF que se procesan en una planta de beneficio; la biomasa residual es en promedio 40 % y el porcentaje restante corresponde a humedad. De acuerdo con un estudio publicado en 2010 por Cenipalma sobre el uso de la biomasa proveniente de la planta de beneficio en Colombia, se encontró que el 83 % de la tusa es transportada desde las plantas de beneficio y esparcida en las plantaciones de palma, mientras el 15 % es utilizado para la producción de compost. En relación con la fibra y el cuesco, el 80 y 67 %, respectivamente, es alimentado al sistema de generación de vapor para proceso y la fracción restante se usa junto con la tusa como enmienda orgánica en las plantaciones de palma, ya sea mediante la aplicación directa de la bioma-

sa o después del proceso de compostaje (García *et al.*, 2010). Como mecanismo de tratamiento de efluentes, las plantas de beneficio cuentan con lagunas anaeróbicas y facultativas para realizar la remoción de la materia orgánica generada por el procesamiento del fruto. Para el caso específico de las plantas de beneficio en Colombia, los valores de materia orgánica medidos a partir de la demanda química de oxígeno (DQO) pueden variar entre los 40.000 y 60.000 mg l⁻¹. Los vertimientos que salen del tratamiento de efluentes son dispuestos a fuentes de agua superficiales o pueden ser usados para fertirriego.

Estudios realizados por Cenipalma sobre el Potencial de Calentamiento Global (PCG) de la cadena productiva del biodiésel de palma colombiano, encontraron que las mayores emisiones de GEI se generan en la etapa de extracción del APC, específicamente en el sistema actual de tratamiento de efluentes en lagunas abiertas, debido a la producción y liberación de metano (CH₄), que tiene un PCG 25 veces mayor al CO₂ (Yáñez *et al.*, 2011; Solomon *et al.*, 2007). Adicionalmente, la misma investigación reportó que la fertilización química durante la etapa agrícola contribuye con 77,9 % de las emisiones generadas en esta etapa, lo que equivale a 16,6 % de las emisiones de la cadena productiva del biocombustible. Con el fin de reducir las emisiones de GEI, se han planteado diversas alternativas de uso de la biomasa, dentro del marco de conceptos de biorrefinería, como cogeneración, carpado de lagunas, biocarbón y compostaje, que además de un estudio de impacto ambiental requieren de una evaluación técnica y financiera que permitan seleccionar la mejor alternativa bajo los criterios de sostenibilidad señalados en la RSPO.

La producción de compost a partir de tusa y efluentes es una de las alternativas que ya se encuentra en desarrollo en algunas plantas de beneficio en Colombia; su mayor contribución a la reducción de las emisiones de GEI es el uso de los efluentes que salen directamente de la planta, en los procesos de compostaje o el uso del vertimiento que sale de la laguna carpada. Estas dos metodologías reducen la emisión de CH₄ en las lagunas de tratamiento, además de que permiten recuperar los nutrientes presentes en la tusa y los efluentes que pueden ser utilizados como enmienda orgánica en las plantaciones, lo que adicionalmente representa un potencial de remplazo de una parte de los requerimientos

de fertilizantes químicos (Stichnothe & Schuchardt, 2011, 2010). Ante el escaso registro de estudios que demuestren lo anteriormente dicho en Colombia, este trabajo presenta una primera aproximación a la incidencia de la producción de compost en la huella de carbono del APC. El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño ambiental de la cadena productiva del aceite de palma, tomando como referencia un estudio de caso y teniendo en cuenta tres metodologías de tratamiento de tusa y efluentes.

Métodos y consideraciones

Tecnología

En Colombia, los proyectos en plantas de compostaje como estrategia para el tratamiento de tusa y efluentes llevan pocos años en el sector palmero y, por ende, se encuentran en proceso de adaptación y mejora continua. Esta situación genera que las metodologías a evaluar y que hacen parte de dichos proyectos, no se encuentren estandarizadas, dificultando el tratamiento de los datos y la interpretación de los resultados.

De acuerdo con lo anterior, fue necesario definir las condiciones más apropiadas para la etapa de producción de compost mediante revisión bibliográfica y visitas a plantas de compostaje ubicadas en diferentes plantas de beneficio de la Zona Oriental colombiana. A continuación se resumen las principales características del proceso de compostaje consideradas para este estudio.

En el proceso de compostaje, la tusa proveniente de la planta de beneficio pasa por un rompedor que afloja y libera los frutos remanentes, con el fin de recuperarlos en un segundo proceso de desfrutado; luego, la tusa es prensada para recuperar alrededor del 46 % del aceite impregnado, que corresponde a valores de aceite a racimo entre 0,20 y 0,25 % y reducir el contenido de humedad hasta 50 % en promedio. La reducción de tamaño también permite aumentar el área superficial de contacto donde ocurrirán las reacciones de descomposición aeróbica. La biomasa se dispone en pilas que son regadas con efluentes en una proporción de 3,2 m³ por cada tonelada de biomasa a ser compostada, en una frecuencia determinada por los ciclos de descomposición mesofílica y

termofílica (2-3 riegos semana⁻¹)¹ (Schuchardt *et al.*, 2002; Stichnothe & Schuchardt, 2010). Luego de conformadas las pilas se inicia el proceso de degradación biooxidativo, que se caracteriza por la alternancia de etapas mesotérmicas (30-40 ° C) con etapas termogénicas (40-75 ° C), donde microorganismos mesófilos, termófilos, bacterias esporígenas y actinomicetos, en presencia de humedad, a temperatura adecuada y bajo condiciones aeróbicas, regulan el pH y descomponen las ceras, proteínas y hemicelulosas (Gómez y Rodríguez, 2009; Torres *et al.*, 1999). La demanda de oxígeno constante del proceso aeróbico exige realizar volteos (2-3 volteos semana⁻¹)² de frecuencia variable mediante equipos especiales con el fin de aportar oxígeno a la mezcla para mantener las condiciones deseadas y evitar la aparición de procesos anaeróbicos. Durante la etapa termogénica, el rango de temperatura se eleva contribuyendo a la eliminación de agentes

patógenos presentes en la mezcla. Transcurridas 8 a 10 semanas, el volumen de las pilas se reduce en valores superiores al 50 % por los procesos de calentamiento, que generan la evaporación de la humedad contenida en las pilas, asimismo, el proceso metabólico cesa por el agotamiento de nutrientes y posterior muerte de las poblaciones microbianas; de esta manera se obtiene el compost, un abono orgánico con características especiales y nutrientes que servirán como enmienda en los suelos y complemento en la fertilización química del cultivo (Gómez y Rodríguez, 2009; Singh *et al.*, 2010; Peláez y Restrepo, 2004).

Finalmente, se consideró que con unas buenas condiciones de operación, no se presentan lixiviados en las pilas de biomasa y si se generaran, estos serían devueltos a las lagunas de tratamientos de efluentes para posterior recirculación al proceso de compostaje, sin liberación directa a cuerpos de agua.

Figura 1. Diferentes estados de estabilización de la tusa durante el compostaje.



Figura 2. Compostera tipo invernadero para el tratamiento de la biomasa de una planta de beneficio del fruto de la palma de aceite.



1 Fuente: Metodología de compostaje en plantas de beneficio en Colombia.

2 Fuente: Datos proporcionados por plantas de compostaje en plantas de beneficio en Colombia.

Escenarios evaluados

Se comparó la incidencia de tres metodologías de tratamiento de biomasa sólida y líquida en la huella de carbono del aceite de palma, a través de la integración de las principales etapas de proceso y etapas intermedias. Los escenarios de tratamientos evaluados fueron:

Escenario 1: aplicación en el cultivo de palma del 100 % de la tusa generada en la planta de beneficio y tratamiento de efluentes en sistema de lagunas abiertas (línea base).

Escenario 2: producción de compost a partir del 100 % de la tusa, otras biomásas (fibra, cuesco y cenizas) y efluentes de la planta de beneficio antes de ingresar a las lagunas de tratamiento y estabilización.

Escenario 3: producción de compost a partir del 100 % de la tusa generada, otras biomásas y los efluentes salientes de la laguna carpada luego de la recuperación del biogás. El biogás, una mezcla rica en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), es conducido hasta un sistema de combustión (Tea) donde se quema en exceso de aire y se liberan a la atmósfera los productos de combustión.

Metodología de evaluación de impactos

La metodología que se empleó para establecer el desempeño ambiental de los tres escenarios en la cadena productiva del APC fue la huella de carbono, esta metodología permite cuantificar el total de emisiones de GEI provocadas por la fabricación de un producto o servicio, durante un periodo de tiempo determinado, y que se encuentra plenamente descrita en las normas ISO 14067 y NTC 6000 para Colombia (ICONTEC, 2013). La unidad de determinación de impactos es kg

$\text{CO}_2\text{eq.}$ y se calcula en base al Potencial de Calentamiento Global (PCG) de cada uno de los GEI emitidos con respecto al dióxido de carbono, como se muestra en la Tabla 1, de esta forma cada una de las emisiones generadas directa o indirectamente por unidad de producto fueron multiplicadas por el factor de PCG para obtener el valor en unidades de $\text{kg CO}_2\text{eq.t}^{-1}\text{producto}$.

Para realizar el estudio de huella de carbono se seleccionó una planta de beneficio, ubicada en Zona Oriental, de la que se obtuvo la información sobre la cadena productiva del aceite de palma, que comprende la etapa de cultivo y extracción para el año referencia 2011. La información se recopiló mediante visitas en las que se diligenciaron formatos en cuanto a productividad, rendimiento, horas de operación, flujos de masa y energía, etc. La recolección de la información se realizó en el segundo periodo de 2012 y el primer trimestre de 2013. Además de la planta de beneficio estudiada y sus proveedores, se visitaron otras plantas de beneficio en diferentes zonas palmeras para obtener información sobre el proceso de producción de compost y los sistemas de captura de metano mediante el carpado de lagunas, este último proceso es considerado en el escenario 3 de evaluación.

A partir de los datos de inventario de huella de carbono, se plantearon los balances de masa de las plantaciones de palma, la planta de beneficio y las metodologías de tratamiento de biomasa y se calcularon las emisiones de GEI en cada una de las etapas de proceso. Con los datos generados de los anteriores desarrollos, se realizó la simulación de la cadena productiva del APC mediante el uso del *software SimaPro 7.3* (Ecoinvent Center, 2007), el cual cuenta con una amplia base de datos que se usó para introducir en el balance de carbono las emisiones de las etapas intermedias, que no se pueden cuantificar directamente en la plantación

Tabla 1. PCG de algunos GEI emitidos a la atmósfera.

Nombre del GEI	Fórmula química	PCG (100 años de horizonte)
Dióxido de carbono	CO_2	1
Metano	CH_4	25
Óxido nitroso	N_2O	298
CFC-11	CCl_3F	4.750
CFC-12	CCl_2F_2	10.900

Fuente: Solomon *et al.* (2007).

y planta de beneficio, como es el caso de la contribución a las emisiones por la generación de energía eléctrica en Colombia o las emisiones por la fabricación de las unidades de transporte y equipos usados en el cultivo y la planta de beneficio, entre otros. A partir de la integración en el *software SimaPro* se obtuvieron los resultados de la huella de carbono del aceite de palma en los tres escenarios evaluados.

Entre las principales consideraciones de este estudio se encuentran:

- Los tres escenarios de evaluación contemplan el uso del 100 % de la tusa generada en la planta de beneficio.
- Se seleccionó una planta de beneficio ubicada en Zona Oriental como estudio de caso.
- Se consideró un cambio de uso de suelo de pastizales a palma, lo que representa un potencial de captura de carbono de $1,89 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Carranza *et al.*, 2008; Henson, 2003; Rondón, 2000).
- Se asumió un porcentaje de remplazo del compost y la tusa de 10 %, es decir, cada kilogramo de fertilizante orgánico (tusa o compost) puede remplazar 0,1 kilogramo de fertilizante químico.
- Se recopiló información de dos plantaciones, que proveen más del 54 % de la fruta procesada en la planta de beneficio seleccionada.
- Para los cálculos de los proveedores de fruta no encuestados se asumió una productividad de

$10,4 \text{ t RFF ha}^{-1}$: dato obtenido de los reportes de ingreso de fruto durante 2011 de la planta de beneficio estudiada.

- La afectación por plagas y enfermedades para la plantación 1 y los proveedores de fruta no encuestados, se asumió igual a la de la plantación 2 debido a la falta de datos sobre estos cultivos.
- El uso de agroquímicos en el cultivo de la palma de aceite genera emisiones que se distribuyen de la siguiente forma: 5 % como emisión atmosférica, 20 % emisión al agua y el restante 75 %, emisión al suelo. En el caso de los alcoholes etoxilados, empleados como tensoactivos y medios de transporte, el 25 % es emitido al agua y el 75 % al suelo (Yusoff & Hansen, 2007).
- La fertilización química en los proveedores fue calculada a partir de trabajos realizados por el Programa de Agronomía de Cenipalma en los talleres de fertilización que se realizan anualmente en las zonas palmeras y que permitieron estimar la demanda de nutrientes respecto a la productividad alcanzada por la plantación y presentada en la Tabla 2 (Molina, 2012).
- Se asumió una densidad de los efluentes a la salida de la planta y de las lagunas de tratamiento, 1.100 y 1.000 kg m^{-3} , respectivamente.
- En los tres escenarios se tomó como base de cálculo para las enmiendas orgánicas el contenido de nu-

Tabla 2. Requerimientos en fertilización química (óxidos) para una productividad de $10,41 \text{ t RFF ha}^{-1}$.

NO_3 (g palma ⁻¹)	P_2O_5 (g palma ⁻¹)	K_2O (g palma ⁻¹)	SO_4 (g palma ⁻¹)	CaO (g palma ⁻¹)	MgO (g palma ⁻¹)	B_2O_3 (g palma ⁻¹)
350	110	720	150	140	160	40

Fuente: Molina (2012). Modelo creado por Cenipalma y proporcionado por el Ing. agrónomo Diego L. Molina, Asistente de Investigación.

Tabla 3. Condiciones de operación más apropiadas en una planta de compostaje.

Tiempo de compostaje	2,5 -3 meses
Relación tusa- efluente	$3,2 \text{ m}^3$ de POME por cada tonelada de tusa prensada
Temperaturas	$T_{\text{mín}}$ (30°C-45°C) $T_{\text{máx}}$ (60°C-75°C)
Tamaño de las pilas	Ancho: 2,5-3 m, alto: 2 a 2,5 y largo: 90- 100 m
Volteos	2-3 volteos semana ⁻¹
Riego	2-3 riegos semana ⁻¹

trientes; es decir 1 tonelada de nutrientes (N, P, K, Ca y Mg).

- Se consideró que para el compostaje del 100 % de la tusa es necesario 40-45 % del efluente generado en la planta de beneficio, para cumplir con la relación 3,2:1.
- Las condiciones más apropiadas para la producción de compost de acuerdo con la revisión bibliográfica y visitas a plantas beneficio, se presentan en la Tabla 3.
- Para el cálculo de los consumos energéticos se asumió la metodología de riego del compost por aspersión, ya que evita el consumo de combustible fósil como en otros casos con el riego de efluentes con carrotanques.
- El tipo de transporte de compost a campo que se consideró, fue el de tractores de 6 t de capacidad, que recorren una distancia promedio de 13 km desde el sitio de producción hasta las plantaciones con un rendimiento de 0,086 gal diésel km⁻¹.
- Bajo las condiciones de operación planteadas se asumió que no se generan cantidades apreciables de lixiviados y de generarse, estos son retornados a las lagunas de estabilización para su tratamiento.
- Para el cálculo de la reducción en la fertilización química por la aplicación de fertilizantes orgánicos, se distribuyeron la tusa y el compost producidos hipotéticamente, en el total de hectáreas cultivadas, cubriendo en su orden la plantación 1, seguido de la plantación 2 y los proveedores. Se consideró la aplicación de 10 t ha⁻¹ de tusa prensada (30 % humedad) o compost (35 % humedad) adaptado de (Abu-Bakar *et al.*, 2010).
- El biogás es acondicionado para quemarse en una Tea, con posterior liberación de gases de combustión (CO₂) a la atmósfera. En este estudio no se consideró el aprovechamiento del biogás en la ge-

neración de energía eléctrica a través de motores de combustión interna o turbinas de gas.

Resultados

Comparación del inventario de la huella de carbono

a. Cultivo

El rendimiento promedio en 2011 de las dos plantaciones proveedoras de fruto encuestadas se muestra en la Tabla 4, así como el rendimiento para los proveedores no encuestados, obtenido de los históricos de la planta de beneficio seleccionada. Las diferencias en los rendimientos son causadas principalmente por el manejo agronómico de la plantación y, en el caso de otros proveedores, el rendimiento puede alcanzar valores bajos por la inadecuada fertilización química o el ineficiente manejo de plagas y enfermedades.

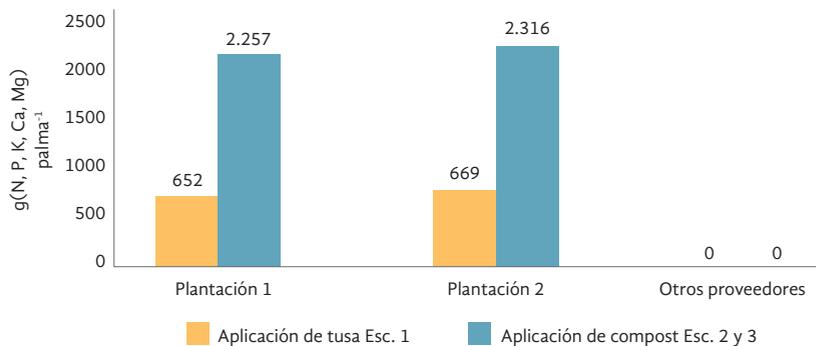
En la etapa de cultivo las mayores diferencias se presentaron en la fertilización química y orgánica. En la Figura 3 se evidencia el aporte de nutrientes en g palma⁻¹ por parte del compost comparado con el aporte de la tusa en la fertilización orgánica. Para una aplicación de 10 t ha⁻¹ en ambos casos el aporte de nutrientes es mayor en el compost. Para otros proveedores no hay aplicación de tusa o compost debido a que con la aplicación de 10 t ha⁻¹ y la cantidad de tusa o compost producida en 2011 en la planta de beneficio estudiada, se alcanza el 100 % de aplicación en las plantaciones 1 y 2.

A partir de los cálculos de aplicación de fertilizantes orgánicos se hicieron ajustes en la aplicación de fertilizantes químicos teniendo en cuenta un porcentaje de remplazo de 10 %. Debido al bajo porcentaje asumido para el remplazo de nutrientes de los fertilizantes orgánicos, la reducción en la fertilización

Tabla 4. Rendimiento del cultivo de palma para el año 2011.

Plantación	Rendimiento (t RFF ha ⁻¹)
Promedio plantación 1	17,69
Promedio plantación 2	18,23
Otros proveedores	10,41

Figura 3. Aplicación de fertilizantes orgánicos en la plantación 1 y 2 y otros proveedores (g nutrientes palma⁻¹).



química no alcanza valores mayores al 10 %, como se muestra en la Figura 4. En la plantación 2, la reducción en la fertilización química es menor comparada con la plantación 1 debido a que, como se planteó en la metodología, no se alcanzó la cobertura del 100 % de las hectáreas cultivadas y, por tanto, la reducción en los valores promedio de fertilización (g palma⁻¹) fue menor respecto a la plantación 1.

b. Etapa de extracción

En el escenario 2, el 44 % de los efluentes se envía directamente al proceso de producción de compost, lo

que genera una reducción de efluentes que ingresan al tratamiento en las lagunas y, por tanto, una disminución de la emisión de metano a la atmósfera. Las Figuras 5 y 6 muestran la disminución de vertimiento al final del proceso de tratamiento de efluentes, así como la reducción de las emisiones de metano cuando se emplean efluentes para producir compost. Para el escenario 2, la reducción de vertimiento y emisión alcanzó el 44 % con respecto a los tratamientos convencionales de tusa y efluentes.

En el escenario 3 se observan diferencias con respecto a las prácticas convencionales (escenario 1) y al

Figura 4. Aplicación de fertilizantes químicos en las plantaciones 1 y 2 (g nutrientes palma⁻¹).

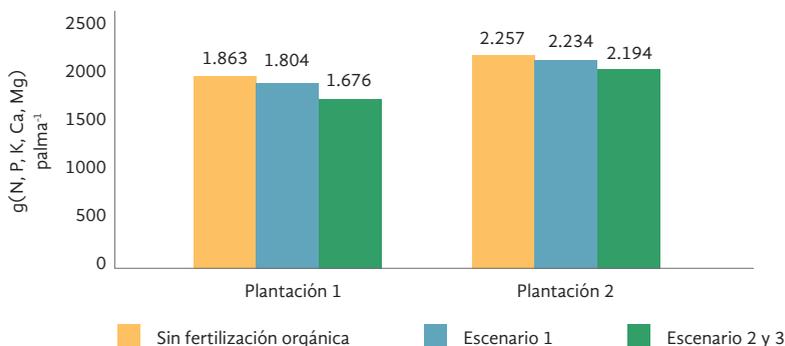
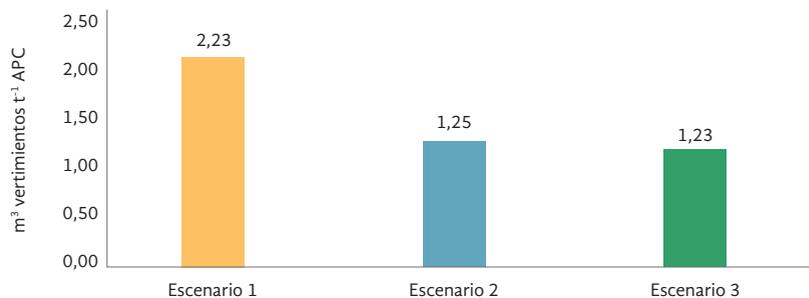


Figura 5. Vertimientos de la planta de beneficio (m³ t⁻¹ APC).



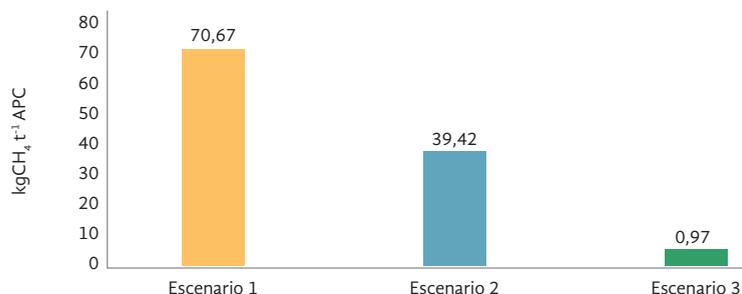


Figura 6. Emisiones generadas por tratamiento de efluentes.

escenario 2. Las diferencias se deben en el primer caso a la mitigación de la emisión de metano directamente a la atmósfera y, en el segundo caso, a que al pasar todos los efluentes generados por la laguna carpada, se logra una mayor captura de metano, mientras que sin el carpado, la proporción de efluentes que no pasa directamente a compostaje, debe ingresar al sistema de tratamiento convencional provocándose la liberación de metano a la atmósfera, de esta forma se alcanza una reducción del 98 % de las emisiones de metano.

Comparación de impacto en la huella de carbono del APC de las opciones de tratamiento de biomasa

A continuación se muestran los resultados de las contribuciones ambientales de cada una de las etapas de proceso en la cadena productiva del APC, en los tres escenarios evaluados.

a. Potencial de calentamiento global por etapas

La Tabla 5 muestra las emisiones de GEI en términos de kg CO₂eq., para cada una de las etapas de la cadena

productiva de aceite de palma, en los tres escenarios evaluados. Entre escenarios no se encontraron grandes diferencias en el PCG de las plantaciones de palma; sin embargo, se muestra un leve aumento en las emisiones en los escenarios 2 y 3 respecto al escenario 1, debido a las emisiones generadas por la logística de transporte y aplicación de tusa y compost.

El escenario 1 presenta el mayor potencial de liberación de emisiones de GEI en la planta de beneficio comparado con los escenarios 2 y 3, debido principalmente a la liberación de metano en las lagunas de oxidación abiertas. Para el escenario 1, el PCG fue 1.452 kg CO₂eq.t⁻¹APC, mientras que en los escenarios 2 y 3 fue 594,1 kg CO₂eq.t⁻¹APC y 608,6 kg CO₂eq.t⁻¹APC, respectivamente. El escenario 3 genera mayor PCG con respecto al escenario 2, ya que al capturarse una mayor cantidad de metano, cuando es quemado en Tea genera una emisión de CO₂ que no se produce en igual proporción cuando se descompone la materia orgánica presente en los efluentes en el proceso de compost, como ocurre en el escenario 2. Este estudio no consideró la producción de energía eléctrica a partir del biogás obtenido, el cual podría disminuir el

Tabla 5. Potencial de emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de proceso.

Sistema	Unidad	IPCC (PCG 100 ^a) Esc. 1	IPCC (PCG 100 ^a) Esc. 2	IPCC (PCG 100 ^a) Esc. 3
RFF: plantación 1	kg CO ₂ eq.t ⁻¹ RFF	99,74	140,00	120,00
RFF: plantación 2	kg CO ₂ eq.t ⁻¹ RFF	99,03	120,15	120,00
RFF: proveedores	kg CO ₂ eq.t ⁻¹ RFF	116,71	116,71	116,71
APC: planta de beneficio	kg CO ₂ eq.t ⁻¹ APC	1.452	594,1	608,6
Nutrientes: P. Compost	kg CO ₂ eq.t ⁻¹ nutrientes		308,3	311,7

uso de combustibles fósiles en la planta de beneficio, favoreciendo el desempeño ambiental del escenario 3.

En cuanto a la producción de compost en la Tabla 5 se presenta el PCG para la producción de compost en los escenarios 2 y 3 siendo 308,3 kg CO₂eq.t⁻¹ nutrientes para el escenario 2 y 311,7 kg CO₂eq.t⁻¹ nutrientes para el escenario 3. Las diferencias nuevamente se dan por la captura de metano y posterior quema en Tea del biogás producido en el escenario 3.

b. Análisis de la huella de carbono de la cadena productiva del aceite de palma

La cadena productiva de aceite de palma con producción y aplicación de compost correspondiente al escenario 3 contribuye a la reducción de GEI. Los cultivos de palma son los que a lo largo de la cadena productiva capturan carbono con -6.010 kg COeq t⁻¹APC, mientras que las principales fuentes de emisiones de GEI se presentan en las etapas de cogeneración, fertilización química y tratamiento de efluentes con 462, 232 y 143 kg CO₂eq.t⁻¹APC respectivamente; las emi-

siones restantes corresponden a procesos remanentes (emisiones asociadas a etapas intermedias), transporte y cambio de uso del suelo (preparación de los terrenos) con 333, 74 y 45 kg CO₂eq.t⁻¹ APC, respectivamente. En la Figura 7 se presentan las emisiones de GEI de la cadena de aceite con producción y aplicación de compost.

De acuerdo a lo anterior, a pesar de las emisiones generadas durante las etapas de cultivo y extracción por los procesos de fertilización, transporte y cogeneración, el balance global por tonelada de APC presenta un potencial de reducción de GEI de -4.720 kg CO₂eq. t⁻¹APC.

Como se observa en la Figura 8, a nivel general, para el escenario 3, las calderas contribuyen con el 36 % del CO₂eq. emitido durante la producción de APC, seguido por los procesos remanentes, la fertilización química y las lagunas anaeróbicas con 26 , 18 y 11 %, respectivamente. Si bien la producción de vapor y energía a través de la combustión de fibra y cuesco generan emisiones (36 %) estas se consideran dentro de un balance neto de carbono igual a cero dado su origen orgánico y participación en un balance cerrado de carbono.

Figura 7. Emisiones de GEI de la cadena de producción de aceite de palma. Escenario 3.

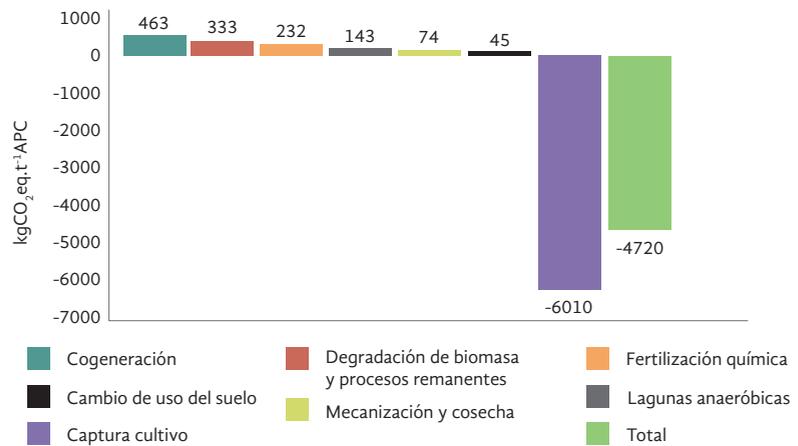
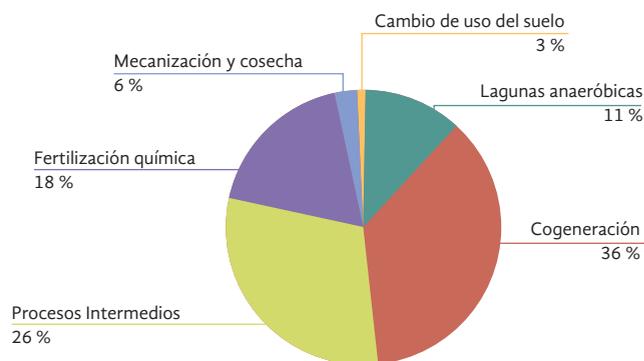


Figura 8. Contribución de emisiones (CO₂eq.) en la planta de beneficio con producción de compost.



La preparación de terrenos durante el cambio de uso del suelo, en este caso de pastizales a cultivo de palma contribuye en el 3 % del total de emisiones. El transporte de RFF del cultivo a la planta de beneficio contribuye con el 6 % restante.

c. Comparación de la huella de carbono del aceite de palma en los tres escenarios de evaluación

Los resultados de la comparación de la huella de carbono obtenida para los tres escenarios de tratamiento de biomasa se muestran en la Figura 9.

En la Figura 9 se confirma que para el estudio de caso, la huella de carbono del aceite de palma con producción de compost tiene un potencial de reducción de emisiones de GEI mayor que el obtenido con las actuales prácticas de tratamiento de tusa y efluentes, siendo -4.140 y -4.720 kg CO₂eq.t⁻¹APC para los escenarios 2 y 3 comparados con -3.320 kg CO₂eq.t⁻¹APC del escenario 1. La reducción de las emisiones corresponde al 20 y 30 % en los escenarios 2 y 3, respectivamente, generado principalmente por la mitigación de la emisión de CH₄ de una gran parte del efluente de la planta de beneficio, que es usado en la planta de compostaje en procesos aeróbicos de descomposición de materia orgánica y en la captura de metano en lagunas carpadas, específicamente en el escenario 3.

La diferencia entre la emisión generada de todo el efluente que pasa por las lagunas anaeróbicas, con la emisión generada por los efluentes que se llevan a compostaje equivale a 534 kgCO₂eq.t⁻¹APC, para el escenario 2 y 1107 kg CO₂eq.t⁻¹APC para el 3, lo que representa una disminución entre 43 y 88 % de las emisiones de CO₂eq. a la atmósfera.

Para la huella de carbono del APC con producción de compost, la etapa de proceso que genera la mayor contribución a las emisiones de GEI son las lagunas anaeróbicas en el escenario 2 y cogeneración para el escenario 3, específicamente en la caldera, mientras que la principal fuente de emisiones en el escenario 1 son las lagunas anaeróbicas, por la emisión de grandes cantidades de metano a la atmósfera.

No se presentaron diferencias en las emisiones generadas por la fertilización química entre los escenarios evaluados, debido al bajo porcentaje de remplazo asumido; sin embargo, cuando se compara el consumo de fertilizantes químicos sin aplicación de orgánicos en campo con la fertilización química acompañada de la aplicación de enmiendas orgánicas (escenario 1, 2 y 3) Figura 4, se evidencian reducciones en los consumos de fertilizantes químicos de hasta el 10 %, lo que representaría una reducción en las emisiones de GEI.

Conclusiones

- Con la producción de compost en la planta de beneficio estudiada se puede reducir el volumen de vertimiento a los cuerpos de agua en 44 %, lo que equivale a una reducción de la emisión de metano de 43 % para el escenario 2 y 98 % para el escenario 3.
- La huella de carbono de la cadena productiva de APC con los actuales tratamientos de tusa y efluentes reduce las emisiones de GEI en un valor de -3.320 kg CO₂eq.t⁻¹ APC.
- La huella de carbono para el APC con producción de compost reduce las emisiones de GEI en un valor

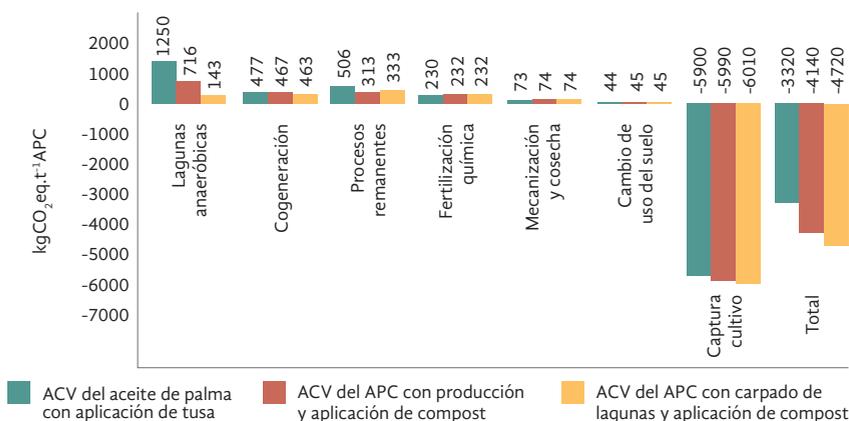


Figura 9. Comparación de emisiones de CO₂eq. de la producción de APC con aplicación de compost o tusa.

de -4.140 kg CO₂eq.t⁻¹APC y -4.720 kg CO₂eq.t⁻¹ APC para los escenarios 2 y 3.

- La huella de carbono del APC en los escenarios 2 y 3 de producción de compost, aumentan el potencial de reducción de emisiones de CO₂eq. en 20 % y 30 %, con respecto a la huella de carbono del aceite del actual tratamiento de tusa y efluentes (aplicación de tusa en campo y tratamientos de efluentes en lagunas anaeróbicas).
- En la etapa de cultivo, la mayor contribución a las emisiones de GEI se da por la aplicación de compuestos nitrogenados en los fertilizantes, que al descomponerse liberan NH₃ a la atmósfera.
- La contribución a las emisiones de las lagunas anaeróbicas en la etapa de extracción del APC en la planta de beneficio se reduce de 48 % en el escenario 1 a 39 % y 11 % con la producción de compost en los escenarios 2 y 3.
- La principal incidencia de la producción de compost en el ciclo de vida del aceite de palma es la disminución de las emisiones de metano en las la-

gunas anaeróbicas por el uso de los efluentes en la planta de compostaje.

Recomendaciones

- Se debe continuar con la realización de estudios de esta índole que permitan analizar ambientalmente las alternativas de uso de la biomasa, las cuales juegan un papel importante en la sostenibilidad del sector palmero.
- Se debe evaluar el escenario con producción de energía eléctrica a partir del biogás recuperado en las lagunas carpadas ya que podría mejorar aún más el desempeño ambiental del cultivo de la palma en Colombia.

Agradecimientos

A las empresas Entrepalmas S.A.S., Aceites Manue-lita S.A., C.I Tequendama Ltda. y Aceites Morichal S.A.S. por su disposición a colaborar en el desarrollo de la investigación. A Fedepalma, entidad administradora del Fondo de Fomento Palmero, quien aporta los recursos de financiación para Cenipalma.

Referencias bibliográficas

- Abu-Bakar, R., Darus, S.Z., Kulaseharan, S., & Jamaluddin, N. (2010). Effects of ten year application of empty fruit bunches in an oil palm plantation on soil chemical properties. *Nutr. Cycl. Agroecosystems*, 89(3), 341-349.
- Carranza, J.D., Etter, A. y Murcia, U. (2008). Efecto de la plantación de palma de aceite (*Elaeis Guineensis* Jacq.) sobre la infiltración, la densidad aparente y el contenido de carbono orgánico del suelo, y diferencias frente a potreros bajo pastoreo, en Villanueva (Casanare). *Ambiente y Desarrollo*, 22, 39-59.
- Ecoinvent Centre. (2007). *Ecoinvent Data V2.0*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, Switzerland.
- García, J.A., Cárdenas, M. y Yáñez, E. (2010). Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Palmas*, 31(2), 41-48.
- Gómez, J. y Rodríguez, D. (2009). Elaboración de compostaje con el fruto de la palma africana. *INIA Divulga*, 13, 17-19.
- Henson, I.E. (2003). The Malaysian National Average Oil Palm: Concept and Evaluation. *Oil Palm Bull*, 46, 15-27.

- ICONTEC. (2013). *Sistemas de gestión ambiental. Huella de carbono: Requisitos*. Bogotá: ICONTEC.
- Miranda, H., Schuchardt, F., Wulfert, K. y Tjahjono, D. (2007). Manejo sostenible de efluentes y tussas en plantas de beneficio de palma de aceite mediante un nuevo proceso. *Palmas*, 28(Especial, Tomo 2), 191-197.
- Molina, D.L. (2012). *Taller de transferencia sobre fertilización de la palma Cenipalma*. Jornada de Capacitación. Cenipalma.
- Peláez, C.M. y Restrepo, A. (2004). *Compostaje y uso en previvero de subproductos de la palma de aceite*. Documento de trabajo. Hacienda Las Flores.
- Rondón, M.A. (2000). *Land Use Change and Balances of Greenhouse Gases in Colombian Tropical Savannas*. Ph.D. Dissertation. Cornell University, Ithaca: NY, USA.
- Schuchardt, F., Darnoko, D., & Guritno, P. (2002). Composting of Empty Oil Palm Fruit Bunch (EFB) with Simultaneous Evaporation of Oil Mill Waste Water (POME). In: *Proceedings, International Oil Palm Conference*. Nusa Dua, Bali, Indonesia, July 8-12.
- Singh, R.P., Ibrahim, M.H., Esa, N., & Iliyana, M.S. (2010). Composting of Waste from Palm Oil Mill: a sustainable waste management practice. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology*, 9(4), 331-344.
- Stichnothe, H., & Schuchardt, F. (2010). Comparison of Different Treatment Options for Palm Oil Production Waste on a Life Cycle Basis. *Int. J. LCA*, 15(9), 907-915.
- Stichnothe, H., & Schuchardt, F. (2011). Life Cycle Assessment of Two Palm Oil Production Systems. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3976-3984.
- Solomon, S.D., Qin, M., Manning, Z., Chen, M., Marquis, K.B., & Averyt, M. (Eds). (2007). *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC*, Chapter 2, pp. 131-217. Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA: Cambridge University Press
- Torres, R., Chinchilla, C. y Ramírez, C. (1999). Compostaje de los desechos agroindustriales de la palma aceitera. En: *Memorias del XI Congreso Nacional Agronómico*. San José de Costa Rica, 19-23 de julio.
- Yáñez, E., Martínez, L.P. y Gualdrón, M.A. (2011). *Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción de biodiésel a partir de aceite de palma utilizando como herramienta el análisis de ciclo de vida (ACV)*. Documento de trabajo. Cenipalma.
- Yusoff, S., & Hansen, S.B. (2007). Feasibility Study of Performing an Life Cycle Assessment on Crude Palm Oil Production in Malaysia. *Int. J. LCA*, 12(1), 50-58.